

УДК 004.3

РАСЧЕТ, ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОГО p-i-n ФОТОДИОДА МИКРОМОЩНОГО ОПТРОНА УВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫХ СХЕМ

Н.П. Проскурин.

Запорожский национальный технический университет.

The paper presents the stages of the calculation of a planar IR p-i-n photodiode UHF and modeling of its performance for several profiles of the impurity concentration of N_a in the p^+ area. Based on the dependencies shown the possibility of increasing the efficiency of conversion of radiation and photogeneration p-i-n photodiode due to the shift of the maximum impurity concentration N_a deep p^+ area, where the surface recombination processes are reduced.

Вступление

Оптоэлектронные связи, имеющие существенные преимущества над металлическими, все чаще применяются в локальных цифровых устройствах (ЦУ), блоках и интегральных схемах (ИС), обеспечивая качественные характеристики каналов передачи/приема цифровых информационных потоков. Элементами связи в них могут служить микромощные оптроны (МО), имеющие активные полупроводниковые (ПП) приборы (например, светодиод СД, инжекционный лазер ИЛ, фотодиод ФД, фототранзистор ФТр., др.), и пассивные (оптический волновод на основе SiO_2 , др.) [1-3]. В связи с этим, оценка методов и методик расчета компонентов МО УВЧ диапазона, обсуждение результатов и их характеристик имеет определенную актуальность, обеспечивая предпосылки перехода к оптическим типам связи между электронными блоками и/или внутри цифровых ИС и автоматов (ЦА) на основе микроконтроллеров [4; 5].

Анализ последних исследований и публикаций

Для разработки МО УВЧ диапазонов одним из этапов является расчет и проектирование их активных компонентов, например, нелинейных твердотельных ПП приборов типа инфракрасного (ИК) СД (излучатель) и p-i-n ФД (фотоприемник). Структуры типа СД на основе гетеросоединений GaAs с добавлением Al являются основными твердотельными излучателями для интегральных оптронов типа СД- p-i-n ФД, которые могут быть размещены в GaAs мезах (сформированы на подложке Si-SiO₂) методом гетерофазной эпитаксии (ГФЭ) [6]. Полученные планарные оптроны имеют симметричную структуру (по 2...4 ИК СД в одной GaAs мезе) и приемлемый коэффициент фотопреобразования – до 3%. Отметим, что интегральные СД и p-i-n ФД функционируют в составе МО в переключаемых режимах на частотах 0,2...1,0 ГГц и выше, являются нелинейными элементами и математический аппарат их описания известен. Переходные процессы таких устройств описываются соответствующими нелинейными дифференциальными уравнениями (ДУ), общих методов решения которых, однако, не существует. Отсутствие общности подхода к интегрированию нелинейных ДУ обусловило число разнообразных методов их решения, нацеленных на различные типы ДУ [7; 8]. Применительно к задачам методы расчета могут быть разделены (с вариантами их комбинаций) на:

- аналитические методы: аналитическое выражение для характеристик нелинейных элементов, либо их кусочно-линейная аппроксимация;
- графические методы: основные операции в них являются графические построения, сопровождаемые вспомогательными вычислительными этапами;
- приближенные методы: получения аналитических выражений (формул), либо численных значений, приближающих с той или иной степенью точности искомое частное решение дифференциального уравнения;
- численные методы (ЧМ): основанные на замене ДУ алгебраическими для приращений переменных за соответствующие интервалы времени.

Последним отдается предпочтение при расчете конкретных (например, с расчетными параметрами) нелинейных ПП приборов и их моделей в связи со сложностью описания пере-

ходных процессов в нелинейной цепи ФД (один р-п переход), который чаще всего связан с усиленным каскадом в виде п-р-п биполярного (два р-п перехода) или образует единую структуру типа ФТр. (область коллектора играет роль ФД, два р-п перехода). В работе рассмотрены некоторые подходы по повышению эффективности преобразования излучения в моделях интегральных р-і-п ФД для планарных МО УВЧ диапазона [9].

Постановка задачи и нерешенные ранее части проблематики

Обычно ПП структура р-і-п ФД формируется на Si подложке, имеющую n_i концентрацию носителей заряда (НЗ), близкую к собственной i (для формирования i -зоны ФД), а p^+ и r^+ области получают методами легирования исходной подложки (например, ионное легирование: p^+ мышьяк As или фосфор P; r^+ бор B, соответственно). Однако вопросы оптимизации параметров интегральных структур р-і-п ФД с точки зрения влияния различных профилей распределения (ПР) концентрации примеси в r^+ области освещены недостаточно [10; 11].

В данной работе предложены, рассмотрены и предложены подходы по увеличению фототока интегральных р-і-п ФД и повышения их эффективности при детектировании оптического излучения ближайшего ИК диапазона. Задача проектирования р-і-п ФД сводится к выбору конструкции (например, планарная; облучение – перпендикулярно плоскости Si подложки или параллельно, др.) получению нескольких блоков параметров: прямых и обратных вольт-амперных характеристик (ВАХ) ПП структуры р-і-п ФД (с учетом неидеальности ряда характеристик: рекомбинационно-генерационных токов, ряда электрофизических эффектов, др.) и связи геометрии ПП структуры (профили легирования, глубины р-п переходов, концентрации примесей, площади фотоокна, др.) с ее выходными статическими и динамическими характеристиками. Далее следует выбор наилучшей модели (из нескольких), например, по критериям расчетных величин: генерации G НЗ в поверхностном слое фотоокна р-і-п ФД (для различных ПР его легирования), времена $\tau_{\text{вкл./выкл.}}$, емкость C р-і-п ФД, др.

Основной материал исследования и его результаты

На рис. 1а, 1б изображена электрическая схема включения р-і-п ФД и ВЧ п-р-п биполярного транзистора (а) и типовой вариант планарной структуры на Si подложке р типа, где р-і-п ФД облучается сверху (б).

Из рис. 1б видно, что часть входящего излучения падает на p область (например, с концентрацией n_i , близкой к собственной i), а часть на r^+ область р-і-п ФД. Следует отметить, что получить требуемое значение генерации G (соответственно фототока $I_{\text{ФД}}$) в i или в n_i области достаточно сложно (мала концентрация носителей заряда – НЗ). Поэтому для диапазона до 3 ГГц можно использовать конструкцию р-і-п ФД с достаточно большой r^+ областью (рис. 1б), где можно получить высокое значение генерации G . Для проектирования интегрального р-і-п ФД ИК диапазона составим табл. 1 в виде исходных данных (ИД) основных параметров – техническое задание (ТЗ) на проектирование.

Таблица 1. Электрические, фотоэлектрические параметры интегрального р-і-п ФД, $T = 25^\circ$.

Наименование параметра р-і-п ФД	Параметр по ТЗ	Расчетное значение
Токовая чувствительность при $\lambda \sim 0,84$ мкм	0,4...0,5 А/Вт	0,45 А/Вт
Номинальное рабочее напряжение, не менее	0,8...1,0 В	0,8 В
Темновой ток K при $U_{\text{ФД}} = 1$ В, не более	0,1 нА	0,001 нА
Рабочая частота, не менее	300 МГц	333 МГц
Граничная частота, не менее	4 ГГц	5 ГГц
Емкость диода, не более	0,01 пФ	0,0045 пФ
Максимум спектральной характеристики	0,8...0,9 мкм	0,84 мкм
Значение фототока на рабочей частоте, не менее	≥ 1 мкА	≥ 1 мкА

Таблица 2. Электрические, излучательные параметры интегрального СД, $T = 25^\circ$.

Наименование параметра СД	Значение параметра
Плотность мощности излучения, не менее	8 Вт/см ²
Мощность излучения (при $I_{\text{СД}} = 100$ мкА), не менее	2,5 мкВт
Прямое напряжение при $I_{\text{пр СД}} = 100$ мкА, не более	1,05 В
Емкость СД, не более	0,005 пФ
Максимум спектрального распределения	0,84 мкм
Ширина спектра излучения	0,8...0,88 мкм
Рабочая частота переключения, не менее	>333 МГц

В нее внесены формализованные параметры интегрального р-і-п ФД (средний столбик) для заданного планарного излучателя (например, в виде микромощного ИК СД, поверхностный вывод излучения на длине волны $\lambda = 0,84$ мкм), параметры которого приведены в табл. 2. Характеристики Si, на основе которого проектируется р-і-п ФД, взяты из [11-14].

Этапы расчета. Во-первых, на основе аналитической модели р-і-п ФД, учитывающей оптические и электронные процессы проведем анализ видов поглощения (основные: собственное, примесное, решеточное, экситонное, свободными НЗ). Для длины волны $\lambda \sim 0,8...0,9$ мкм ведется расчет коэффициента поглощения α по формуле (1) для собственного поглощения Si, учитывая изменение ширины ΔE запрещенной зоны (ЗЗ) с ростом концентрации примеси (например, р+), вклад которой возрастает при смыкании ее уровня в ЗЗ с зоной проводимости (ЗП) для донорного типа N_d и валентной зоной (ВЗ) для акцепторного типа N_a примесей [11-14]:

$$\alpha = A(\hbar\omega - \Delta E)^{3/2}, \quad (1)$$

где A – коэф. пропорциональности, зависит от характеристик ПП структуры;

$\hbar$ – постоянная Планка;

ω – круговая частота длины волны λ .

Анализ показывает, что *примесное поглощение* собственного Si уходит в дальнюю ИК область с длиной волны $\lambda \geq 10$ мкм, влияние *решеточного поглощения* (идущего на тепловой нагрев решетки р-і-п ФД) и *экситонного поглощения* (процесс без вклада в фототок) несущественно, а уровень *поглощения свободными НЗ* по сравнению с собственным на 1...2 порядка ниже [11-14]. Таким образом, для расчета р-і-п ФД при облучении достаточно учитывать собственное поглощение ПП и дополнительно примесное N_a такого типа, когда происходит изменение ширины ΔE ЗЗ исходного Si при ее смыкании с ВЗ (для различных уровней легирования N_a вблизи дна ЗЗ например, для создания р+ слоя р-і-п ФД). С учетом приведенных рассуждений, теоретических выкладок приведенных в [11-14] далее выполнены промежуточные расчеты в программной среде (ПС) «Исследование» (создана для расчета ПП структур по методикам, изложенным в [15; 16]).

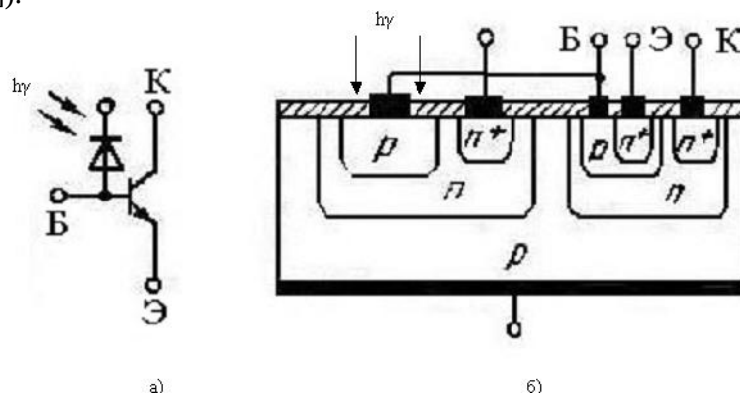


Рис. 1. Конструкция р-і-п ФД и ВЧ п-р-п транзистора: а – электрическая схема включения, б – вариант выполнения структуры их двух отдельных приборов (слева р-і-п ФД, справа ВЧ п-р-п транзистор)

Их результаты сведены в табл. 3, которая показывает, что α выше для легированного Si, и чем выше уровень легирования N_a , тем эффект сильнее выражен и с увеличением α не наблюдается процессов насыщения и спада уровня генерации G.

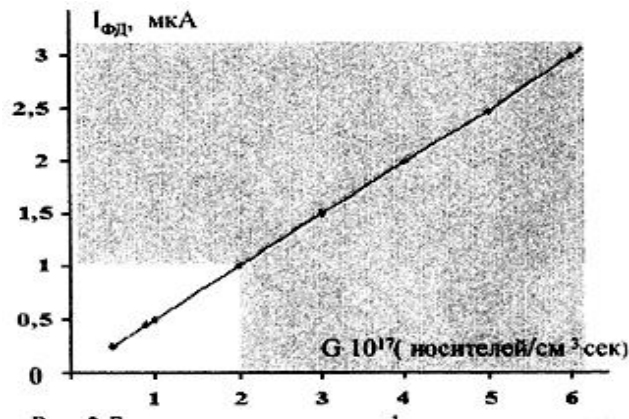


Рис. 2. Расчетная зависимость фототока интегрального ФД от объемной скорости генерации носителей (серый фон – область приемлемых значений)

На рис. 2 изображена кривая расчетных зависимостей фототока $I_{\text{ФД}}$ генерации G р+ области фотоокна р-і-п ФД, из которой видно, что значение $I_{\text{ФД}} \geq 1 \text{ мкА}$ (по ТЗ) достигается при уровне генерации $G \geq 2 \cdot 10^{17} \text{ (ед./см}^3 \cdot \text{мкс)}$ и выше. На рис. 3 приведены расчетные значения генерации G по глубине для четырех типов Si (серый фон: область приемлемых значений).

Таблица 3. Расчетные значения: коэффициентов поглощения α (ед./см³) и генерации G (ед./см³·мкс) в р-і-п ФД на основе собственного и легированного Si при излучении с λ_1 и λ_2 .

Длина волны λ , мкм	$n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$		$N_a = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$		$N_a = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$		$N_a = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$		$N_a = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$	
	α	G	α	G	α	G	α	G	α	G
$\lambda_1 = 0,9$	5870	$1,49 \cdot 10^{17}$	6180	$1,54 \cdot 10^{17}$	7460	$1,886 \cdot 10^{17}$	11300	$2,871 \cdot 10^{17}$	13900	$3,531 \cdot 10^{17}$
$\lambda_2 = 0,8$	10400	$2,35 \cdot 10^{17}$	10800	$2,44 \cdot 10^{17}$	12200	$2,76 \cdot 10^{17}$	16300	$3,687 \cdot 10^{17}$	18900	$4,27 \cdot 10^{17}$

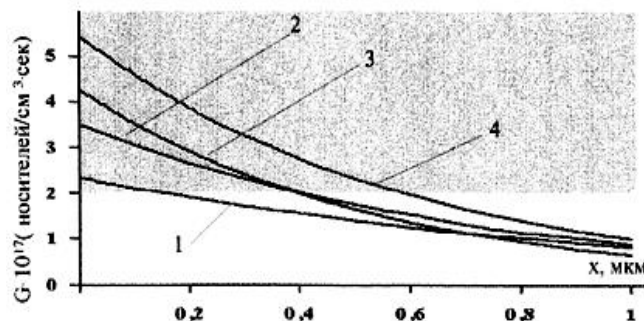


Рис. 3. Расчетное распределение объемной скорости генерации носителей по глубине полупроводника 1 – для собственного кремния ($\lambda = 0,8 \text{ мкм}$); 2 – для примесного кремния, $N = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ($\lambda = 0,9 \text{ мкм}$); 3 – для примесного кремния, $N = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ($\lambda = 0,9 \text{ мкм}$); 4 – для примесного кремния, $N = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ($\lambda = 1,12 \text{ мкм}$)

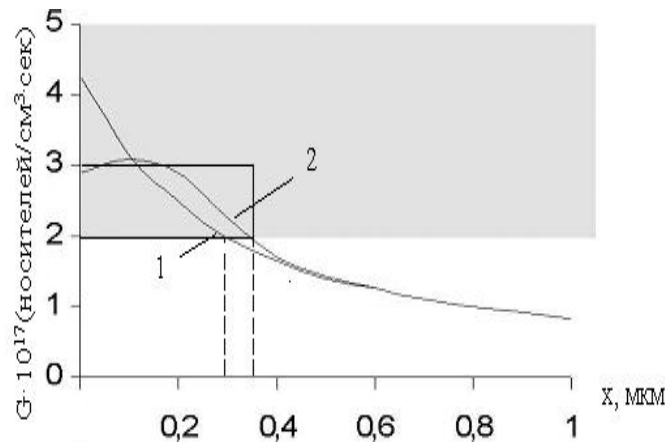


Рис. 4. Расчетное распределение объемной скорости генерации носителей по глубине полупроводника 1 – для профиля а) р-і-п ФД, 2 – для профиля б) р-і-п ФД. Серым фоном обозначена зона приемлемых значений

Во-вторых, анализ полученных расчетных значений $I_{\text{ФД}}$ (рис. 2, рис. 3) показывает, что значение G зависит от коэффициента поглощения излучения α , который, в свою очередь, зависит от концентрации легирующей примеси, ширины ЗЗ и энергии падающего излучения (табл. 3). Средняя величина $G_{\text{СР}}$ в ПП структуре р-і-п ФД для собственного Si на глубине X 0,2...0,4 мкм находится в зоне неприемлемых значений (белое поле рис. 3, кривая 1), ее среднее значение составило менее $1,7 \cdot 10^{17}$ (ед./см³·мкс), и соответственно, значение среднего фототока $I_{\text{ФД}} < 1$ мкА. Анализ зависимостей для примесного Si (рис. 3, кривые 2, 3) показывает, что в ПП структуре р-і-п ФД с р⁺-слоем средняя величина $G_{\text{СР}}$ принимает приемлемое значение (более чем $3,0 \dots 2,0 \cdot 10^{17}$ ед./см³·мкс, серое поле допустимых значений рис. 3, кривые 2, 3) на глубинах 0,2...0,4 мкм и, соответственно, средний фототок $I_{\text{ФД}} \geq 1$ мкА.

Таким образом, в ПП структуре р-і-п ФД предпочтительным является применение примесной р⁺-области (толщиной примерно до 0,4...0,5 мкм), что увеличивает значение G почти в 1,5 раза; а суммарная толщина р⁺- и і-области может составить значение до 1 мкм. Далее делается предположение о большей эффективности при применении р⁺-слоя с повышенной концентрацией (для дополнительной в нем генерации НЗ) на некоторой глубине ПП структуры. Основная причина заключена в том, что генерация НЗ в примесном Si сопровождается повышенной поверхностной рекомбинацией в приповерхностном слое, что приводит к снижению фоточувствительности и фототока. Следует учитывать, что профиль легирования р⁺-слоя (анод р-і-п ФД) не является равномерным по концентрации и задача анализа генерации НЗ в р-і-п ФД в связи с этим усложняется. Если легировать принимающий излучение р⁺-слой по функции Гаусса, то профиль распределения (ПР) имеет вид А: концентрация примеси N_a на поверхности ПП структуры имеет максимальное значение с последующим ее снижением по мере увеличения толщины X . В этом случае максимальная величина генерации G также будет на поверхности, где время жизни ($t_{\text{НЗ}}$) значительно снижается из-за поверхностных дефектов и границы раздела. Поэтому предложено использовать ПР Б, максимум концентрации которого находится на некоторой глубине X_i порядка 0,1...0,2 мкм.

Выбор толщины анода р-і-п ФД и ПР концентрации примеси N_a проводился по зависимостям G от глубины X (для различных ПР) и коэффициента поглощения (табл. 3). Расчетные кривые (для двух ПР) приведены на рис. 4, из которого видно, что необходимое значение фототока $I_{\text{ФД}} \geq 1$ мкА (с учетом рис. 2) достигается при толщинах до 0,3 мкм (1) и 0,35 мкм (2). Анализ кривых 1, 2 рис. 4 показывает, что предпочтительной является кривая 2, который обеспечивает более равномерный уровень $G \sim 3 \cdot 10^{17}$ (ед./см³·мкс) от поверхности и до глубины 0,2 мкм ПП структуры с дальнейшим ее снижением до $G \sim 2 \cdot 10^{17}$ (ед./см³·мкс) на глубине 0,35 мкм. Таким образом происходит достаточная генерация НЗ не только в приповерхностном слое, но и в объеме ПП структуры р-і-п ФД и, параллельно, существенно снижен уровень поверхностной

их рекомбинации. Это указывает на определенные преимущества профиля Б (кривая 2) перед А (кривая 1) на рис. 4.

В третьих, далее с помощью ПС “Исследование” [15; 16], в которую введены расчетные параметры р-і-п ФД в виде ИД, получены семейство его ВАХ. На рис. 5 приведены расчетная зависимость фототока р-і-п ФД (площадь фотоприемного окна $S \sim 25 \text{ мкм}^2$) при воздействии входного одиночного оптического синусоидального импульса длительностью 2 нс для двух крайних значений G ($2 \cdot 10^{17}$ и $3 \cdot 10^{17}$ ед./см³·мкс), выделенных верхним прямоугольником на рис. 4 (при величине задержки $\tau_{з \text{ ФД}} < 0,1$ нс). Из кривых 1 и 2 графика рис. 5 видно, что амплитудное значение фототока $I_{\text{ФД}}$ обеих кривых в максимуме превышает 1 мкА, однако для кривой 2 (профиль Б) оно почти в два раза больше, чем для кривой 1 (профиль А) с лучшей крутизной фронтов. Площади кривых 1, 2 рис. 5 соответствуют суммарной величине $Q = I_{\text{ФД}} \cdot t$ (в процессе фотогенерации НЗ) и соотносятся как 1 : 1,5, что подтверждает соотношение величин G ($2 \cdot 10^{17}$ и $3 \cdot 10^{17}$ ед./см³·мкс) на рис. 4. На рис. 6 показан фрагмент графика ВАХ – спад фототока $I_{\text{ФД}}$ для двух профилей (А и Б), причем более эффективное рассасывание НЗ ($\tau_r < 0,5$ нс) соответствует кривой 2, что приводит к снижению значения темнового тока I_r , времени переключения $t_{\text{пер.ФД}}$ и улучшению динамических параметров интегрального р-і-п ФД. Величина емкости р-і-п ФД $C_{\text{ФД}} \sim \Delta Q / \Delta U$ определяются из графика на рис. 7 и составляет 0,0045 пФ. Величина I_r определяется током утечки р-і-п ФД (расчетная ВАХ на рис. 8, $I_{r, \text{обр.}} \sim 10^{-11}$ А). Расчетные параметры интегрального р-і-п ФД приведены в табл. 1, крайний правый столбик. На основе моделирования семейства ВАХ ФД с профилями А и Б делается выбор в пользу последнего, на котором максимальная концентрация N_a находится на глубине X мкм от поверхности.

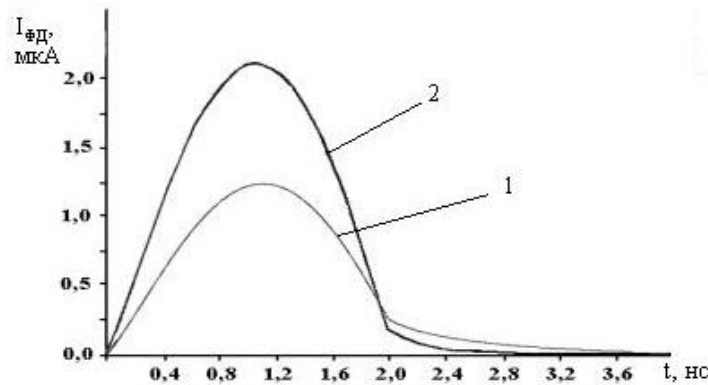


Рис. 5. Расчетная зависимость выходного ИФД от времени (воздействие синусоидальным оптическим сигналом длительностью 2 нс) для 1 – $G = 2 \cdot 10^{17}$, 2 – $G = 3 \cdot 10^{17}$ (носителей/см³ сек.)

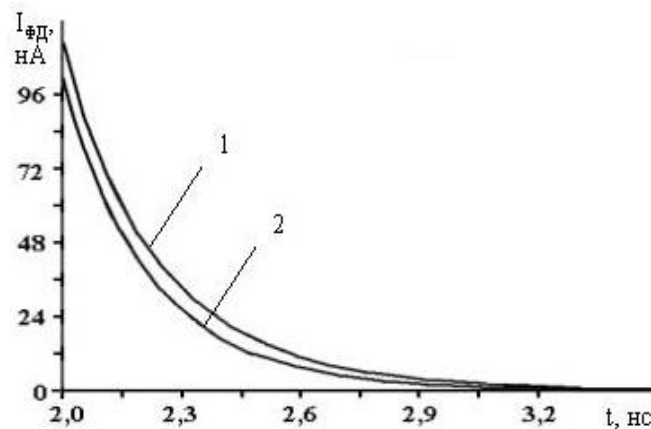


Рис. 6. Расчетная кривая спада тока ФДД в динамическом режиме для профилей р-і-п ФД, 1-А, 2-Б

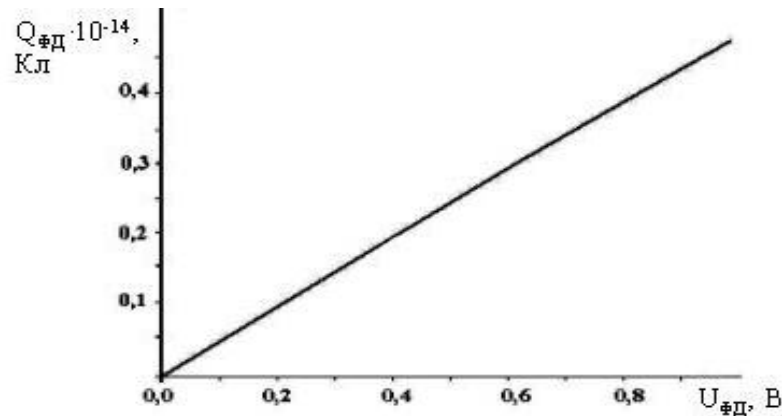


Рис. 7. Расчетное изменение заряда в структуре р-і-п ФД при приложении запирающего напряжения

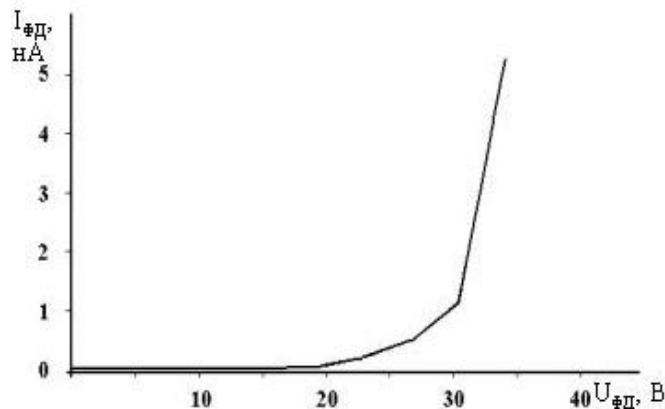


Рис. 8. Расчетная обратная АХ р-і-п (при отсутствии излучения)

Выводы

1. Предложено в качестве основы для интегрального ИК р-і-п ФД УВЧ диапазона для микромощных оптронов применить ПП подложку с концентрацией примеси n^- , близкой к собственной i , а расчет его параметров провести ЧМ по известным методикам.

2. При расчете характеристик р-і-п ФД учтены виды поглощения для Si (собственное, примесное, решеточное, экситонное, свободными НЗ), подтвержден основной вклад собственного (в i или n^- области) и примесного поглощения (в p^+ области) фотоокна ПП структуры на величину генерации G и фототока $I_{\text{ФД}}$.

3. Получены расчетные значения коэффициентов поглощения α для видов Si: собственного (n^- , аналог i области) и нескольких примесных (легирована до N_a p^+ область) для двух длин волн λ (0,8 и 0,9 мкм) ближней ИК области, определены их значения. Показано, что при увеличении N_a не происходит эффекта насыщения величины генерации G выбранной ПП структуры, что дает возможность дальнейшего ее повышения (соответственно, фототока $I_{\text{ФД}}$).

4. Для улучшения параметров р-і-п ФД, увеличения значения генерации G и снижения нежелательной рекомбинации НЗ проведено моделирование нескольких профилей распределения (ПР) ПП структуры. Увеличение значения величины генерации G и фототока $I_{\text{ФД}}$ достигнуты с ПР, который имеет максимум концентрации не у поверхности р-і-п ФД, а на некоторой ее глубине.

5. Получено семейство ВАХ ИК р-і-п ФД УВЧ диапазона, определены основные его параметры и характеристики, которые сведены в сравнительную таблицу заданных ТЗ и расчетных значений. Они указывают на достижение поставленной цели проектирования, а также актуальность и перспективность предложенного подхода при совершенствовании фотодетекторов на основе Si.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2003. – 450 с.
2. Корнейчук, В. И. Волоконно-оптические измерения / В. И. Корнейчук, И. П. Лесовой. – К. : Наукова думка, 2002. – 323 с.
3. Гребнев, А. К. Оптоэлектронные элементы и устройства / А. К. Гребнев, В. Н. Гридин, В. П. Дмитриев. – М. : Радио и связь, 1998. – 336 с.
4. [Электронный ресурс]. – Корпорация Intel представляет прототип высокоскоростного оптического интерфейса ввода/вывода для межкомпонентных соединений кристалл – кристалл. Режим доступа: [http://Intel.SiliconPhotonics//JornalTechnology@Intel, april 2004, Ian Young](http://Intel.SiliconPhotonics//JornalTechnology@Intel,april2004,IanYoung), с. 3-8.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Thunderbolt ...Light Peak](http://ru.wikipedia.org/wiki/Thunderbolt...LightPeak)
6. Проблемы интеграции структур гетероэлектроники с кремниевыми ИС / В. И. Осинский, П. Ф. Олексенко, А. В. Палагин и др. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1999. – № 1. – С. 3-17.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://3ys.ru/Методы решения дифференциальных уравнений/...](http://3ys.ru/Методы_решения_дифференциальных_уравнений/)
8. Полянин, А. Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики / А. Д. Полянин, В. Ф. Зайцев, А. И. Журов. – М. : Физматлит, 2005. – 256 с.
9. Проскурин, Н. П. Моделирование оптоэлектронного инвертора на модели микромощной оптопары УВЧ диапазона для оптических интерфейсов цифровых автоматов / Н. П. Проскурин, С. С. Грушко // Системи обробки інформації. – 2011. – № 3 (93). – С.72-75.
10. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы : учебн. пособ ; 8-е изд., испр. / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – СПб. : Лань, 2006. – 480 с
11. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 т. / С. М. Зи. – М. : Мир, 1984. – 912 с.
12. Шалимова, К. В. Физика полупроводниковых приборов / К. В. Шалимова. – М. : Энергия, 1976. – 416 с.
13. Амброзьяк, А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов : пер. с польск. под ред. Н. И. Тюшкевича / А. Амброзьяк. – М. : Радио и связь, 1970. – 392 с.
14. Баранский, П. И. Полупроводниковая электроника : справочник / П. И. Баранский, В. П. Клочков, И. В. Потыкевич. – К. : Наукова думка, 1975. – 704 с.
15. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов / В. П. Григоренко, П. Г. Кузьмин, В. А. Кузьмин, Т. Т. Мнацаканов. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
16. Мнацаканов, Т. Т. Универсальный метод аналитической аппроксимации подвижности основных носителей заряда в полупроводниках в широком диапазоне температур и уровней легирования / Т. Т. Мнацаканов, М. Е. Левинштейн, Л. И. Поморцева, С. Н. Юрков // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 1. – С. 56-60.

Отримано редакцією 12.04.2014 р.

Проскурін Микола Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж. Запорізький національний технічний університет.

E-mail: askold1993@mail.ru